



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος**

Πτυχιακή εργασία

Μαζούρη Μαρία

**«Μετρήσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και φωτοσύνθεσης
σε καλλιέργεια σίτου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης
της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-
2»**

Επιβλέπων καθηγητής

**Κυπαρίσσης Άρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Οικοφυσιολογίας
Φυτών**

Βόλος, 2020

«Μετρήσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και φωτοσύνθεσης σε καλλιέργεια σίτου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2»

“Photosynthesis and photosynthetic pigments measurements in wheat for the development of a yield prediction model using Sentinel-2 satellite images”

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Άρης Κυπαρίσσης (επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευθυμία Λεβίζου (μέλος) Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Χρήστος Καβαλάρης (μέλος) Ε.ΔΙ.Π., Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1. ΣΙΤΑΡΙ.....	10
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	10
1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	10
1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ.....	12
1.4. ΒΟΤΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	12
2. ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	13
3. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ.....	14
3.1. ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ Sentinel-2.....	15
3.2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ.....	17
4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	22
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	24
1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	24
2. ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	25
3. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ LSM.....	26
4. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ.....	28
5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	28
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	29
1. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ.....	29
2. ΕΙΔΙΚΗ ΜΑΖΑ ΦΥΛΛΩΝ (Leaf Specific Mass, LSM).....	31
3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΟ JAZ ΜΕ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ.....	32
4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ Sentinel-2 ΜΕ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ.....	36
5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ JAZ ΜΕ ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ Sentinel-2.....	40
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	42

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	46

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν φωτοσυνθετικά χαρακτηριστικά και δείκτες βλάστησης, όπως προκύπτουν από την διακύμανση της ανακλαστικότητας, καλλιέργειας σκληρού σίτου προκειμένου να συλλεχθούν δεδομένα εισόδου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2. Σκοπός της εργασίας ήταν να συσχετιστούν δεδομένα ανακλαστικότητας της καλλιέργειας με οικοφυσιολογικές μετρήσεις στον αγρό. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών, η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από την ένταση φωτός και τη θερμοκρασία, και εξήχθησαν δείκτες βλάστησης από επίγειο φασματοφωτόμετρο (Jaz) σε μια καλλιέργεια σκληρού σιταριού καθ' όλη τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου. Στην καλλιέργεια εφαρμόστηκαν δύο μεταχειρίσεις, συμβατική κατεργασία και ακαλλιέργεια (απευθείας σπορά χωρίς όργωμα και χωρίς απομάκρυνση των υπολειμμάτων από την προηγούμενη καλλιέργεια). Από τις επίγειες μετρήσεις της ανακλαστικότητας της καλλιέργειας εξήχθησαν οι δείκτες βλάστησης NDVI, NDRE, SAVI, EVI, PRI, TCARI, PSRI, TVI, SARVI, OSAVI, TCARI/OSAVI. Στη συνέχεια, οι δείκτες αυτοί συσχετίστηκαν με τις φωτοσυνθετικές χρωστικές αλλά και με αντίστοιχους δείκτες που προέκυψαν από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2 της ESA. Συσχετίσεις επίσης έγιναν και μεταξύ των φωτοσυνθετικών χρωστικών και των δεικτών από το δορυφόρο. Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών εμφάνισαν μία αργή και σταδιακή πτώση από το Φεβρουάριο μέχρι τα μέσα Μαΐου, οπότε άρχισε η γήρανση των φύλλων. Η μέγιστη φωτοσύνθεση του σίτου στην συγκεκριμένη καλλιεργητική περίοδο και έδαφος που διεξήχθη το πείραμα καταγράφηκε στους 25-26°C και η ελάχιστη σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5°C και μεγαλύτερες των 45°C. Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές εμφάνισαν μία ευθεία συσχέτιση με τους δείκτες βλάστησης, με χαμηλό συντελεστή συσχέτισης όταν η συγκέντρωσή των χρωστικών εκφράζεται ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) και ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg/g) ενώ όταν εκφράζονται ανά επιφάνεια εδάφους (mg/m^2) παρατηρούνται συσχετίσεις της τάξης του 0,7 ή και 0,8. Συγκεκριμένα ο NDRE που προέκυψε τόσο από τις μετρήσεις του επίγειου φασματοραδιόμετρου (Jaz), όσο και από τον δορυφόρο Sentinel-2 εμφάνισε τις ισχυρότερες συσχετίσεις με τη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών σίτου, όταν αυτές εκφράζονται ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους. Αποτυπώνει επομένως την συγκεκριμένη αναπτυξιακή παράμετρο πιο

ικανοποιητικά σε σχέση με τους υπόλοιπους, ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης (NDVI, EVI κ.α.). Τέλος, οι δείκτες βλάστησης που εξάγονται από το επίγειο φασματοραδιόμετρο (Jaz) και τον δορυφόρο Sentinel-2 εμφανίζουν εξαιρετικά καλές συσχετίσεις μεταξύ τους.

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από την Barilla Hellas, Πρόγραμμα Ελληνικού Σίτου MISKO, στο πλαίσιο του έργου: *«Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής του σίτου με τη χρήση δορυφορικών εικόνων από τους δορυφόρους Sentinel της ESA. - Α. Μετρήσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και φωτοσύνθεσης»*, στην οποία εκφράζουμε τις ευχαριστίες μας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΙΤΑΡΙ

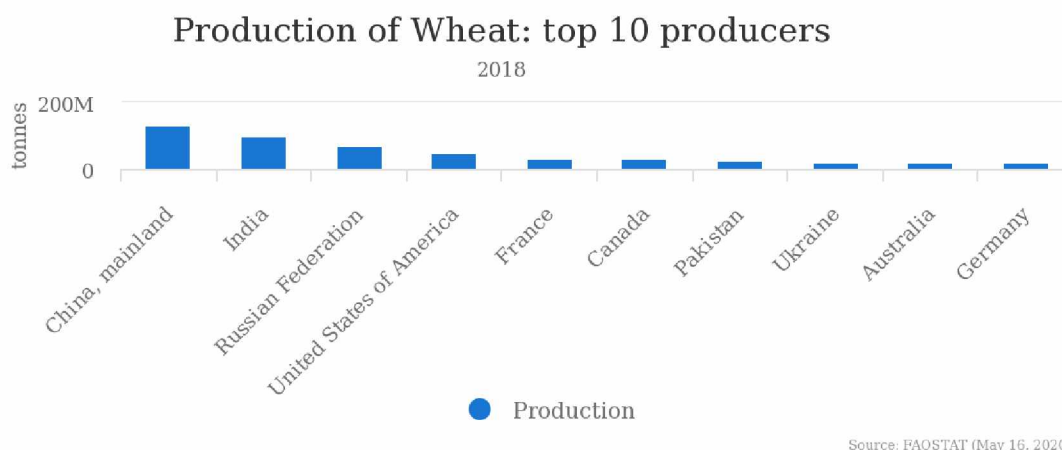
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η καλλιέργεια του σιταριού άρχισε από την αρχαιότητα και δεν γνωρίζουμε την καταγωγή του, ούτε την περιοχή της πρώτης καλλιέργειας. Από τις αρχές της ανθρώπινης ιστορίας η σπουδαιότητα των σιτηρών για το ανθρώπινο γένος υπήρξε σημαντική καθώς αποτέλεσε έναν από τους βασικότερους παράγοντες της επιβίωσης και της εξέλιξης των πρώτων πολιτισμών. Η εξημέρωση των φυτών προχώρησε πολύ γρήγορα και οφείλεται στην ανάγκη του ανθρώπου να παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα τροφής με την ελάχιστη δυνατή εργασία (Royo et al., 2017). Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι διπλοειδείς και τετραπλοειδείς γενότυποι εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στις λεκάνες των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη γύρω στο 8000 π.Χ, ενώ στην Ελλάδα και στις γύρω περιοχές οι γενότυποι αυτοί εμφανίστηκαν το 5000 π.Χ. (Παπακώστα, 2012) .

Ο σίτος αποτελεί το πιο διαδεδομένο σιτηρό στον κόσμο. Καλλιεργείται κυρίως σε εύκρατα κλίματα. Είναι φθινοπωρινή καλλιέργεια αλλά σε περιοχές με δριμύ χειμώνα καλλιεργείται σαν εαρινή. Το πιο διαδεδομένο είδος σιταριού είναι το μαλακό, καθώς προσαρμόζεται καλύτερα και αντέχει περισσότερο σε πιο ψυχρά κλίματα, σε αντίθεση με το σκληρό όπου προτιμάται σε ξηροθερμικές περιοχές. Οι άγριοι τύποι σιταριού είχαν στάχυν με εύθραυστη ράχη έτσι ώστε να γίνεται η διασπορά των σπόρων και να εξασφαλίζεται η διαιώνιση του είδους. Κατά την εξέλιξη και την βελτίωση των ποικιλιών όμως ευνοήθηκαν τύποι σίτου με σχετικά άθραυστη ράχη, μεγάλους σπόρους και με αυξημένη ικανότητα αδελφώματος.

1.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ

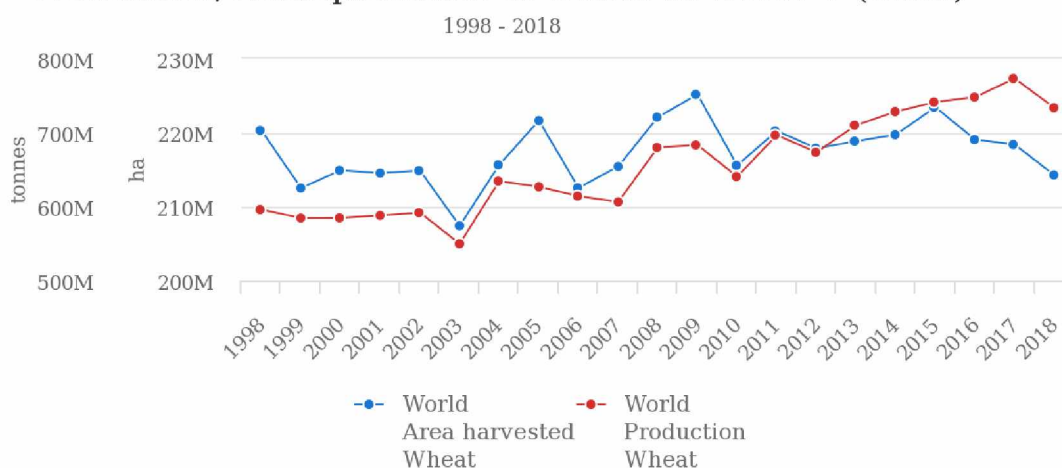
Οι χώρες με τη μεγαλύτερη κατά σειρά παραγωγή για το έτος 2018, σύμφωνα με τα δεδομένα του FAOSTAT, απεικονίζονται στην Εικόνα 1.



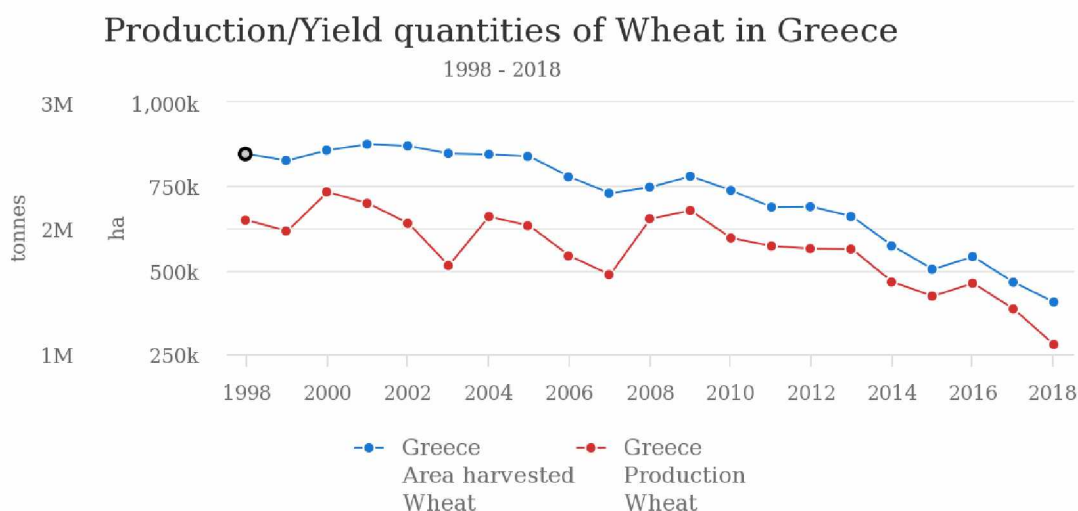
Εικόνα 1: Παγκόσμια παραγωγή σίτου για το έτος 2018(<http://www.fao.org/faostat>).

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) την εικοσαετία 1998-2018 παρατηρείται μια αύξηση (με διακυμάνσεις) τόσο στην παραγωγή σίτου όσο και στις καλλιεργούμενες εκτάσεις που αυτό καταλαμβάνει, σε παγκόσμιο επίπεδο. Η παγκόσμια παραγωγή κάποιες χρονιές ξεπερνάει τους 700εκ. τόνους και οι καλλιεργούμενες εκτάσεις τα 220εκ. εκτάρια. Ενώ για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα στην εγχώρια παραγωγή και καλλιεργήσιμη έκταση παρατηρείται μια πτωτική τάση της τάξης του 1 εκ. τόνου και 442 χιλ. εκταρίων (Εικόνα 3).

Production/Yield quantities of Wheat in World + (Total)



Εικόνα 2: Παγκόσμια παραγωγή σιταριού για τα έτη 1998-2018 (<http://www.fao.org/faostat>).



Εικόνα 3: Εγχώρια παραγωγή σιταριού για τα έτη 1998-2018 (<http://www.fao.org/faostat>).

1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ

Ταξινομικά το σιτάρι ανήκει στην οικογένεια των αγρωστωδών (Graminae), στη φυλή Triticeae και είναι φυτό του γένους *Triticum*. Ο διαχωρισμός των διάφορων ειδών γίνεται με βάση γενετικά χαρακτηριστικά και κυρίως τις ομάδες χρωμοσωμάτων που περιέχουν.

Το πιο διαδεδομένο είδος σιταριού που καλλιεργείται σήμερα είναι το μαλακό (*T. Aestivum* L. subsp. *aestivum*). Κύρια χρήση του είναι η παραγωγή αλεύρων και συνεπώς η παραγωγή ψωμιού. Ακολουθεί το σκληρό σιτάρι (*T. Turgium* subsp. *durum*) όπου χρησιμοποιείται κυρίως στην παρασκευή ζυμαρικών όπως τα μακαρόνια.

1.4. ΒΟΤΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το σιτάρι φέρει όλα τα βοτανικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της ομάδας των σιτηρών. Το ριζικό του σύστημα είναι θυσσανώδες και παρουσιάζει καλή ανάπτυξη σε βαθιά, γόνιμα και καλά στραγγιζόμενα εδάφη. Η ανάπτυξη των ριζών επηρεάζεται από τη μηχανική σύσταση, τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους. Συνήθως φτάνουν σε βάθος 30-50 cm, έχουν όμως την ικανότητα να φτάσουν και σε βάθος 2 m, αν οι συνθήκες το επιτρέψουν (Παπακώστα, 2012). Ο βλαστός των σιτηρών (ή

αλλιώς καλάμι) έχει κυλινδρική μορφή και αποτελείται από μεσογονάτια διαστήματα, τα οποία είναι κενά στο εσωτερικό τους και από γόνατα ή κόμβους. Το τελευταίο μεσογονάτιο που φέρει και την ταξιανθία είναι το μεγαλύτερο σε μήκος. Από τις καταβολές των οφθαλμών στο σημείο της στεφάνης φύονται τα νέα στελέχη των φυτών, τα λεγόμενα αδέρφια(Παπακώστα, 2012). Τα φύλλα των σιτηρών απαρτίζονται από τον κολεό και το έλασμα. Ο κολεός αποτελεί το κατώτερο μέρος του φύλλου και περιβάλλει τον βλαστό. Στο έλασμα υπάρχουν τα στόματα που είναι διατεταγμένα με παράλληλη διάταξη και στις δύο επιφάνειες, με τα περισσότερα να παρατηρούνται στην άνω επιφάνεια του φύλλου. Το έλασμα του σιταριού παρουσιάζει μία προς τα δεξιά συστροφή. Η ταξιανθία του σιταριού είναι στάχης που απαρτίζεται από πολλά σταχύδια τοποθετημένα εναλλάξ πάνω στη ράχη. Η ταξιανθία του σκληρού σιταριού είναι πιο συμπαγής από εκείνη του μαλακού(Παπακώστα 2012).

2. ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Η αύξηση του ανταγωνισμού στη γεωργία τα τελευταία χρόνια, έχει οδηγήσει στην ανάγκη για δραστική μείωση του κόστους στη γεωργική παραγωγή. Ταυτόχρονα, τα αυξανόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν εκτός των άλλων και από την υπερβολική χρήση εισροών έχουν κάνει επιτακτική τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση των επιβλαβών εισροών στον αγρό. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της πληροφορικής έχουν δημιουργηθεί πολύτιμα εργαλεία ο συνδυασμός των οποίων οδήγησε στη διαμόρφωση μίας νέας αντίληψης για τον τρόπο εφαρμογής της γεωργίας, στη Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture). Στη Γεωργία Ακριβείας λαμβάνεται υπόψη η παραλλακτικότητα του αγροτεμαχίου ως προς τον χώρο και τον χρόνο. Συνεπώς γίνονται χειρισμοί και παρεμβάσεις πολύ στοχευμένες, σε αντίθεση με την παραδοσιακή γεωργική διαχείριση που αντιμετωπίζει το χωράφι ως ενιαίο σώμα με παρεμβάσεις που βασίζονται σε μια γενικευμένη εικόνα (Καρυδάς και Συλλαίος, 2000).

Οι κύριοι στόχοι της Γεωργίας Ακριβείας είναι η αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών, η βελτίωση της ποιότητας των παραγομένων προϊόντων, η πιο αποδοτική χρήση των χημικών, η εξοικονόμηση της ενέργειας και η προστασία του εδάφους και των νερών από την ρύπανση (Φουντάς και Γέμτος, 2015).

3. ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ

Καταλυτικός παράγοντας για την εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας ήταν η ανάπτυξη και εξέλιξη της Τηλεπισκόπησης που σύμφωνα με τον γενικό της ορισμό αφορά τη συλλογή δεδομένων για κάποιο αντικείμενο από μακριά. Ένας πιο ειδικός ορισμός της τηλεπισκόπησης την περιγράφει ως «την καταγραφή πληροφοριών από το υπέρυθρο, το ορατό, το εγγύς υπέρυθρο και το μικροκυματικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από απόσταση μέσω οργάνων όπως φωτογραφικές μηχανές, σαρωτές, laser, γραμμικές και χωρικές συστοιχίες εικονοστοιχείων τοποθετημένες σε πλατφόρμες όπως αεροσκάφη, μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή δορυφόροι και η ανάλυση των πληροφοριών που συλλέχθηκαν μέσα από οπτική και ψηφιακή επεξεργασία» (Jensen, 2000). Η παρατήρηση της επιφάνειας της Γης είναι δυνατή με τη χρήση ψηφιακών αισθητήρων που ανιχνεύουν και καταγράφουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται από ένα σώμα ή μία περιοχή που μελετάται και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα. Οι αισθητήρες αυτοί είναι τοποθετημένοι σε μία πλατφόρμα (π.χ. δορυφόρος, UAV, UGV, αεροσκάφη). Η ανακλώμενη ακτινοβολία χρησιμοποιείται έναντι της πραγματικής ιδιότητας που εξετάζεται (Jensen, 2000). Κάθε αντικείμενο που μελετάται πάνω στη Γη, έχει ένα μοναδικό τρόπο να αντανακλά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διαφορετικά μήκη κύματος, επομένως το φάσμα της ανακλαστικότητας του είναι ουσιαστικά η φασματική του υπογραφή. Ο τρόπος με τον οποίο ανακλάται το φως εξαρτάται από το υλικό και τις ιδιότητες της επιφάνειας. Για παράδειγμα, η ανακλαστικότητα των φύλλων εξαρτάται από τη δομή τους και τη χημική τους σύσταση, καθώς η χλωροφύλλη έχει την ιδιότητα να ανακλά σε μεγάλο βαθμό την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο πράσινο τμήμα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και να την απορροφά στο μπλε και κόκκινο τμήμα.

Υπάρχουν δύο ειδών αισθητήρες, οι ενεργητικοί και οι παθητικοί. Οι ενεργητικοί αισθητήρες (π.χ. σαρωτές RADAR και laser) εκπέμπουν τεχνητή ακτινοβολία για την παρακολούθηση της επιφάνειας της γης ή των ατμοσφαιρικών χαρακτηριστικών. Οι παθητικοί αισθητήρες αντιθέτως δεν χρησιμοποιούν τη δική τους πηγή ακτινοβολίας αλλά ανιχνεύουν και καταγράφουν την ανακλώμενη ηλιακή και την θερμική ακτινοβολία στα ορατά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού

φάσματος (Πετράκης, κ.α., 2015). Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις ιδιότητες του οργάνου και της πλατφόρμας (τη δορυφορική τροχιά, τη θέση και τον προσανατολισμό του αισθητήρα πεδίου, την ενεργή ή παθητική ανίχνευση, τη συστοιχία ανιχνευτών και τα χαρακτηριστικά των οπτικών φακών, καθώς και τις δυνατότητες αποθήκευσης) καθώς αυτές ορίζουν τις φασματικές δυνατότητες, τις δυνατότητες κατεύθυνσης και πόλωσης, τη χωρική ανάλυση, τη συχνότητα επίσκεψης και τέλος τον λόγο σήμα/θόρυβο.

Παραδείγματα παραμέτρων που μπορούν να καταγραφούν άμεσα ή έμμεσα με τηλεσκοπικές μεθόδους, σύμφωνα με τους Καρυδά και Συλλαίο (2000) είναι:

- α) χωρική θέση
- β) υψόμετρο
- γ) χρώμα
- δ) φασματική συμπεριφορά της χλωροφύλλης
- ε) βιομάζα
- στ) ποσοστό υγρασίας της βλάστησης
- ζ) ποσοστό υγρασίας εδάφους η θερμοκρασία.

3.1. ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ Sentinel-2

Το Copernicus είναι το Πρόγραμμα Παρατήρησης της Γης της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), τα κράτη μέλη και τους οργανισμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο παρακολουθεί τον πλανήτη και το περιβάλλον του προς όφελος των πολιτών της Ευρώπης. Παρέχει δεδομένα, πληροφορίες και υπηρεσίες που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα γεωσκόπησης και *in situ* (μη διαστημικά) δεδομένα. Από τεχνολογικής πλευράς, πρόκειται για ένα σύνολο που αποτελείται από διάφορων τύπων συστήματα και όργανα συλλογής δεδομένων από διαφορετικές πηγές: 6 δορυφόρους παρατήρησης της γήινης επιφάνειας (οικογένεια Sentinel), αερομεταφερόμενες πλατφόρμες εφοδιασμένες με ειδικούς αισθητήρες και καταγραφείς της γήινης επιφάνειας και τέλος σταθερούς

αισθητήρες συλλογής και καταγραφής των διαφόρων παραμέτρων και μεταβλητών που αφορούν το γήινο περιβάλλον. Από την έναρξη του Sentinel-1A το 2014, η Ευρωπαϊκή Ένωση ξεκίνησε μια διαδικασία για την τοποθέτηση ενός πλήρους αστερισμού σχεδόν 20 δορυφόρων σε τροχιά πριν από το 2030. Σήμερα, υπάρχουν επτά δορυφόροι Sentinel σε τροχιά, τεσσάρων διαφορετικών τύπων. Οι δορυφόροι Copernicus, μαζί με τους επίγειους, αερομεταφερόμενους και θαλάσσιους αισθητήρες μέτρησης, παρέχουν τεράστιες ποσότητες παγκόσμιων δεδομένων. Το πρόγραμμα αυτό έχει ως βασικό σκοπό την μελέτη και παρακολούθηση του περιβάλλοντος της γης (ξηρά και θάλασσα), της ατμόσφαιρας, της αλλαγής του κλίματος καθώς και την διαχείριση έκτακτων καταστάσεων. Επιπλέον έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών όπως μεταξύ άλλων, την παρακολούθηση κλιματικών αλλαγών, την αειφόρο ανάπτυξη, την προστασία του περιβάλλοντος, την γεωργία, τη δασολογία, την ιχθυολογία κ.ά. (Copernicus, Earth Observation Satellites 2015).

Δύο πανομοιότυποι δορυφόροι Sentinel-2 λειτουργούν ταυτόχρονα, σε φάση 180° ο ένας στον άλλο, σε σύγχρονη τροχιά ήλιου και μέσο υψόμετρο 786 km. Οι Sentinel-2 A και B είναι εξοπλισμένοι με ένα πολυφασματικό αισθητήρα (MSI), που παρέχει δεδομένα σε διάστημα πέντε ημερών, με πολλαπλές φασματικές ζώνες (13) και χωρική ανάλυση από 10 έως 60 m (τέσσερις ζώνες στα 10 m, έξι ζώνες στα 20 m και τρεις ζώνες στα 60 m) (Sentinel-Handbook, 2015). Το Multi Spectral Instrument (MSI) χρησιμοποιεί την ιδέα push-broom. Ένας αισθητήρας push-broom λειτουργεί συλλέγοντας σειρές δεδομένων εικόνας κατά μήκος της τροχιακής βάσης και χρησιμοποιεί την εμπρόσθια κίνηση του διαστημικού σκάφους κατά μήκος της διαδρομής της τροχιάς για να παρέχει νέες σειρές για απόκτηση. Η μέση περίοδος παρατήρησης σε χερσαίες και παράκτιες περιοχές είναι περίπου 17 λεπτά και η μέγιστη περίοδος παρατήρησης είναι 32 λεπτά. Οι φασματικές ζώνες, τα μήκη κύματος καθώς και η χωρική ανάλυση που αντιστοιχεί σε αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Band	Κεντρικό μήκος κύματος, nm	Πλάτος καναλιού, nm	Χωρική ανάλυση, m
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20
8a	865	20	20

Πίνακας 1: Οι φασματικές ζώνες, τα μήκη κύματος και η χωρική ανάλυση των Sentinel-2 (ESA –Handbook, 2015).

3.2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Με την συλλογή και την επεξεργασία των τηλεσκοπικών δεδομένων που λαμβάνονται προκύπτουν και οι δείκτες βλάστησης (VIs). Οι δείκτες βλάστησης συνδυάζουν φασματικές πληροφορίες από επιλεγμένα μήκη κύματος σε μια τιμή, η οποία σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή μία ιδιότητα της βλάστησης, και συνήθως αποτελούν ένα μέτρο εκτίμησης της υγιούς βλάστησης. Μπορούν να προκύψουν ως συνδυασμός της ακτινοβολίας διάφορων φασματικών περιοχών, για παράδειγμα με πολλαπλασιασμό ή διαίρεση μεταξύ τους (Ξενούλης, 2011).

Με τη βοήθεια των δεικτών βλάστησης μπορούμε να συλλέξουμε πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα των φυτικών ιστών σε νερό, το ποσοστό της φυτικής κάλυψης, την περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη, την πράσινη βιομάζα, την απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία καθώς και πολλές άλλες πληροφορίες για την υγεία και το στάδιο ανάπτυξης μιας καλλιέργειας. Οι πληροφορίες αυτές είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τους παραγωγούς καθώς μπορούν να κάνουν στοχευμένες επεμβάσεις και συνεπώς να έχουν άμεσο οικονομικό όφελος

αλλά και έμμεσο, προστατεύοντας το χωράφι τους και κατ' επέκταση το περιβάλλον από πλεονάζουσες εισροές.

Κάθε δείκτης βλάστησης θα πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ως προς τις βιοφυσικές παραμέτρους των φυτών με τις οποίες σχετίζεται κατά προτίμηση με γραμμική απόκριση. Θα πρέπει να συνδυάζεται άμεσα με κάποια συγκεκριμένη μετρήσιμη βιοφυσική παράμετρο όπως η βιομάζα, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI), η απορροφούμενη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (APAR). Επιπλέον, θα πρέπει να κανονικοποιεί τους εξωγενείς παράγοντες, όπως η γωνία του ήλιου, η γωνία παρατήρησης του αισθητήρα και οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των τιμών των δεικτών για δεδομένα κατανεμημένα στο χώρο και το χρόνο. Θα πρέπει να κανονικοποιεί επίσης τις επιδράσεις των ενδογενών παραμέτρων της διαμόρφωσης ψηφιακής τιμής της βλάστησης, όπως των διαφορετικών υποβάθρων και φυτικής κόμης, συμπεριλαμβανομένης της τοπογραφίας, των διαφορετικών εδαφών και των διαφορών στη γηρασμένη ή ξυλώδη βλάστηση. Σε πολλούς δείκτες χρησιμοποιείται η αντιστρόφως ανάλογη σχέση ανάμεσα στην ανακλαστικότητα της υγιούς πράσινης βλάστησης στο ερυθρό και στο εγγύς υπέρυθρο (Jensen, 2000).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες βλάστησης.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

όπου: ρ_{nir} είναι η ανακλαστικότητα στο κοντινό υπέρυθρο (nearinfrac-red)

ρ_{red} η ανακλαστικότητα στην κόκκινη περιοχή του φάσματος

Ο NDVI είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες βλάστησης, με την πιο ευρεία χρήση. Εκφράζεται από την παραπάνω εξίσωση όπου NIR είναι η απορρόφηση στο εγγύς υπέρυθρο και RED είναι η απορρόφηση στο ερυθρό. Στηρίζεται στο ότι η χλωροφύλλη απορροφά έντονα το ορατό φως και ιδιαίτερα την κόκκινη ακτινοβολία για χρήση στη φωτοσύνθεση, ενώ η κυτταρική δομή των φύλλων αντανακλά έντονα την υπέρυθη ακτινοβολία (από 0,7 έως 1,1 μm). Ο NDVI παίρνει τιμές -1 έως 1. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε περιοχές με επιφάνειες νερού, ανθρωπογενείς

κατασκευές, βράχους, σύννεφα, χιόνι. Το γυμνό έδαφος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,2. Τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν υγιή φυτά (Φουντάς και Γέμος 2015).

NDRE (Normalized Difference of Red Edge)

$$NDRE = \frac{\rho_{nir} - \rho_{RE}}{\rho_{nir} + \rho_{RE}}$$

όπου ρ_{RE} είναι η ανακλαστικότητα στο «κόκκινο άκρο» (red edge) του φάσματος, με κέντρο τα 715nm.

Ο δείκτης NDRE αποτελεί μια παραλλαγή του NDVI. Η διαφορά των δύο δεικτών βρίσκεται στις φασματικές ζώνες από τις οποίες προκύπτουν. Ενώ ο NDVI χρησιμοποιεί ως σήμα την κόκκινη περιοχή, ο NDRE χρησιμοποιεί την περιοχή του «κόκκινου άκρου» (red edge) του φάσματος (Fitzgerald et al, 2006). Αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη της συγκέντρωσης χλωροφύλλης καθώς ανταποκρίνεται σε αλλαγές στη χλωροφύλλη α (Chl α) και έναν δείκτη της υγείας του αγρού και της καλλιέργειας (Li et al, 2014, Fitzgerald et al, 2006).

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}$$

όπου L είναι συντελεστής προσαρμογής σε σχέση με το υπόβαθρο

Ο SAVI είναι ένας βελτιωμένος δείκτης βλάστησης που ενσωματώνει ένα συντελεστή προσαρμογής (L) στις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του εδάφους. Έχει υπολογιστεί ότι τιμή 0,5 στον L ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις φωτεινότητας του εδάφους και εξαλείφει την ανάγκη για πρόσθετη βαθμονόμηση για διαφορετικά εδάφη (Huete and Liu 1997). Η ανάγκη για την ανάπτυξη βελτιωμένων δεικτών βλάστησης προκύπτει από το γεγονός ότι παρά τη χρησιμότητα του NDVI για την εκτίμηση των ιδιοτήτων της βλάστησης πολλές φορές η χρήση του περιορίζεται από εξωτερικές και εσωτερικές επιδράσεις (Jensen, 2000).

SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index)

$$SARVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{rb}}{\rho_{nir} + \rho_{rb} + L}$$

όπου $\rho_{rb} = \rho_{red} - 1 * (\rho_{blue} - \rho_{red})$ και ρ_{blue} ανακλαστικότητα στην μπλε περιοχή του φάσματος

Ο SARVI ελαχιστοποιεί τόσο τον εδαφικό όσο και τον ατμοσφαιρικό θόρυβο και οδηγεί σε μια πιο σταθερή εξίσωση που αποτελεί παραλλαγή του NDVI (Huete and Liu 1997).

EVI (Enhanced Vegetation Index)

$$EVI = G \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L}$$

Ο δείκτης EVI είναι τροποποιημένος δείκτης NDVI με ένα παράγοντα προσαρμογής εδάφους L και δύο συντελεστές C_1 και C_2 οι οποίοι περιγράφουν τη χρήση του μπλε καναλιού για τη διόρθωση του κόκκινου καναλιού για την ατμοσφαιρική σκέδαση αερολυμάτων. Οι συντελεστές C_1, C_2 και L παίρνουν συνήθως τις τιμές 6, 7,5 και 1 αντίστοιχα. Το G είναι ένας παράγοντας κέρδους και παίρνει συχνά την τιμή 2,5. Ο δείκτης αυτός έχει βελτιώσει την παρακολούθηση της βλάστησης σε περιοχές με υψηλή βιομάζα (Jensen, 2000).

TVI (Triangular Vegetation Index)

$$TVI = \frac{1}{2} [120(\rho_{nir} - \rho_{green})] - 200(\rho_{red} - \rho_{green})$$

όπου ρ_{green} είναι η ανακλαστικότητα στην πράσινη περιοχή του φάσματος

Οι Broge & Leblanc (2000) ανέπτυξαν το τριγωνικό δείκτη βλάστησης (TVI), ο οποίος περιγράφει την ενέργεια ακτινοβολίας που απορροφάται από τις χρωστικές ως συνάρτηση της σχετικής διαφοράς μεταξύ της ανακλαστικότητας στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο σε συνδυασμό με το μέγεθος της ανακλαστικότητας στην περιοχή του πρασίνου, όπου οι χλωροφύλλες α και β δεν παρουσιάζουν σχεδόν καθόλου απορρόφηση (Jensen, 2000).

TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index) - **OSAVI** (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)

$$TCARI = 3[(\rho_{700} - \rho_{670})] - 0.2(\rho_{700} - \rho_{550})\left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}}\right)$$

$$OSAVI = \frac{(1 + 0.16)(\rho_{800} - \rho_{670})}{(\rho_{800} + \rho_{670} + 0.16)}$$

όπου ρ_{700} , ρ_{800} κλπ. η ανακλαστικότητα στα συγκεκριμένα μήκη κύματος

Ο TCARI σχετίζεται με την ποσότητα της χλωροφύλλης στην βλάστηση. Είναι ευαίσθητος στις παρεμβολές της ανακλαστικότητας του εδάφους, κυρίως για βλάστηση με χαμηλό LAI. Για τον λόγο αυτό ο TCARI χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον OSAVI. Ο λόγος $\frac{TCARI}{OSAVI}$ παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με την περιεκτικότητα της βλάστησης σε χλωροφύλλη (Jensen, 2000).

PRI (Photochemical Reflectance Index)

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$$

Ο PRI έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης καταπόνησης, ενώ εφαρμόζεται και για ανίχνευση συμπτωμάτων ασθένειας. Ο PRI όντας δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς της ανακλαστικότητας παίρνει τιμές από -1 έως 1. Για τον προσδιορισμό του χρησιμοποιούνται οι τιμές της ανακλαστικότητας στα 531 nm και 570 nm. Οι τιμές ανακλαστικότητας σε αυτά τα μήκη κύματος επηρεάζονται από τη συγκέντρωση και τις μεταβολές του κύκλου των ξανθοφυλλών. Ο PRI έχει συσχετιστεί με την αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης (Garbulsky et al., 2011, Xue and Su 2017).

PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)

$$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{700}}$$

Αυτός ο δείκτης σχετίζεται με την αναλογία καροτινοειδών προς χλωροφύλλη. Η αύξηση του PSRI υποδηλώνει αυξημένη καταπόνηση ή γήρανση της κόμης και ωρίμανση των καρπών των φυτών. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν

παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης, ανίχνευση καταπόνησης των φυτών και ανάλυση της παραγωγής των καλλιεργειών (Ren et al., 2017).

4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

Με τη βοήθεια των δεικτών βλάστησης και με άλλα τηλεσκοπικά δεδομένα μπορούμε να δημιουργήσουμε μοντέλα εκτίμησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας ενός οικοσυστήματος. Πιο παλιές μελέτες συνέδεσαν τον δείκτη NDVI απευθείας με την καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα (NPP) σε ετήσια κλίμακα. Ωστόσο, μια τέτοια σχέση δεν αποδεικνύεται σταθερή λόγω των κλιματικών μεταβολών από έτος σε έτος ή την αλλαγή διαχείρισης της περιοχής. Στις μέρες μας όμως χρησιμοποιούνται τηλεσκοπικά δεδομένα σε διάφορους αλγορίθμους για την εκτίμηση πρωτογενούς παραγωγικότητας σε μεγάλη χωρική κλίμακα (Σταγάκης, 2012).

Μια από τις πιο εφαρμοσμένες προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση της παραγωγικότητας είναι η προσέγγιση αποδοτικότητας χρήσης φωτός (Light Use Efficiency-LUE) (Medlyn 1998). Πρόκειται για μοντέλα top-down τα οποία βασίζονται στην απλή παραδοχή ότι η πρωτογενής παραγωγικότητα του θόλου (GPP) υπολογίζεται από τη συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία (APAR) πολλαπλασιασμένη μία παράμετρο μετατροπής ϵ .

$$GPP = \epsilon * APAR = \epsilon * PAR * FPAR$$

Όπου : GPP η πρωτογενής παραγωγικότητα του θόλου

ϵ , ο συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά προϊόντα

PAR, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία που δέχεται ο θόλος

APAR, η PAR που απορροφά ο θόλος

FPAR, το ποσοστό της PAR που απορροφάται από τον θόλο.

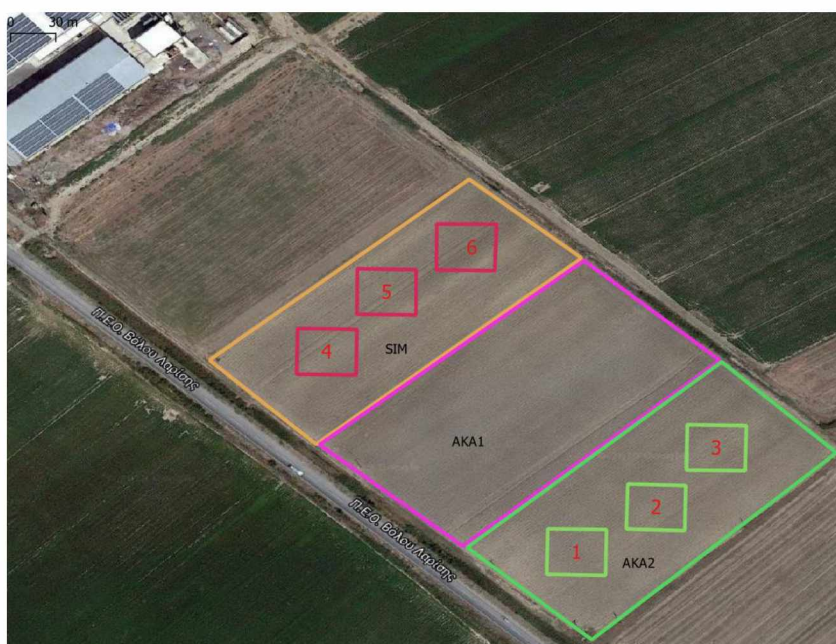
Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ δημοφιλής λόγω της απλότητας της όσον αφορά τις υπολογιστικές απαιτήσεις αλλά και της παραμετροποίησης της αφού η παράμετρος FPAR μπορεί να υπολογιστεί από δορυφορικά δεδομένα, γεγονός που καθιστά εύκολη τη χρήση της σε μεγάλη κλίμακα. Η τιμή της παραμέτρου ϵ καθορίζεται από μία τιμή ϵ_{max} η οποία είναι χαρακτηριστική του τύπου βλάστησης και η οποία

μεταβάλλεται από περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η διαθεσιμότητά του νερού (Μάρκος, 2013).

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά την καλλιεργητική περίοδο Νοεμβρίου 2018-Ιουνίου 2019 σε έναν πειραματικό αγρό στον Θεσσαλικό κάμπο στην περιοχή της Μόδεστου Λάρισας, ο οποίος σπάρθηκε με ποικιλία σκληρού σιταριού. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5 ο αγρός χωρίστηκε σε τρία επιμέρους τμήματα. Το ένα (SIM) αποτελούσε την συμβατική καλλιέργεια (όργωμα και μετά σπορά) ενώ τα άλλα δύο τμήματα (AKA1 και AKA2) σπάρθηκαν με την μέθοδο της ακαλλιέργειας ή αλλιώς ακατεργασίας (απευθείας σπορά χωρίς να έχει προηγηθεί κατεργασία εδάφους). Τα τμήματα του αγρού που σπάρθηκαν με την μέθοδο της ακαλλιέργειας είχαν υπολείμματα από την προηγούμενη καλλιέργεια που ήταν βαμβάκι, ενώ το τμήμα της συμβατικής ήταν απαλλαγμένο απ' όλα τα υπολείμματα. Το AKA1 χωράφι σπάρθηκε λίγες μέρες πριν τα άλλα δύο (16 Νοεμβρίου 2018), τα οποία σπάρθηκαν την ίδια μέρα (6 Δεκεμβρίου 2018). Έπειτα έγινε οριοθέτηση των αγρών με χρήση GPS καθώς και ορισμός των 6 πειραματικών τεμαχίων (plots) στα AKA2 και SIM. Τα plots, διαστάσεων 30 x 30 m, δημιουργήθηκαν αφενός για να είναι δυνατή η σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με τις μετρήσεις πεδίου και αφετέρου για να διασφαλιστεί η στατιστικότητα και επαναληψιμότητα των επιτόπιων μετρήσεων. Τα plots 1, 2, 3 αντιστοιχούσαν στο AKA2 ενώ τα 4, 5 και 6 στο SIM. Τέλος έγινε αποτύπωση των αγρών σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS).



Εικόνα 5: Ο πειραματικός αγρός όπου εκπονήθηκε το πείραμα. Με τετράγωνα αποτυπώνονται οι πειραματικές μονάδες (plots). Τα 1-3 αφορούν τη μεταχείριση της ακαλλιέργειας (ΑΚΑ2) και τα 4-6 τη μεταχείριση της συμβατικής καλλιέργειας(SIM).

Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της μελέτης πραγματοποιήθηκαν 12 επισκέψεις στον αγρό. Η πρώτη έγινε στις 5/2/2019 και ακολούθησαν επισκέψεις στις 14/2, 20/2, 1/3, 6/3, 18/3, 29/3, 3/4, 11/4, 17/4, 8/5 και στις 23/5.

2. ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Κατά τις επισκέψεις στον αγρό καταγράφονταν η ανακλαστικότητα των φύλλων της καλλιέργειας με το φασματοραδιόμετρο JAZ (Ocean Optics, Inc., Dunedin, FL, USA) στα συγκεκριμένα plots. Πρόκειται για ένα όργανο που μετράει ανακλαστικότητα σε μήκη κύματος από τα 340 nm έως περίπου τα 1027 nm με την βοήθεια μίας οπτικής ίνας. Για την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων αρχικά χρειαζόταν να ρυθμιστεί σωστά το όργανο και να γίνει απαλοιφή του θορύβου καθώς επίσης και βαθμονόμηση (calibration), με τη χρήση επιφάνειας γνωστής ανακλαστικότητας (Spectralon®, Labsphere, Inc., NorthSutton, NH). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν πριν τις μετρήσεις για κάθε plot. Για τη μέτρηση της ανακλαστικότητας σε κάθε plot ακολουθούσαν μια πορεία σχήματος Z και κάθε 10 βήματα λαμβανόταν μία μέτρηση και αποθηκευόταν στο όργανο (περίπου 15 μετρήσεις ανά plot). Από τα δεδομένα του φασματοραδιομέτρου υπολογίζονταν οι παρακάτω δείκτες βλάστησης:

Normalized Difference Vegetation Index

$$NDVI = \frac{\rho_{842} - \rho_{665}}{\rho_{842} + \rho_{665}}$$

Normalized Difference of Red Edge

$$NDRE = \frac{\rho_{842} - \rho_{705}}{\rho_{842} + \rho_{705}}$$

Soil Adjusted Vegetation Index

$$SAVI = \frac{(1 + 0.5)(\rho_{842} - \rho_{665})}{\rho_{842} + \rho_{665} + 0.5}$$

Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index

$$SARVI = \frac{\rho_{842} - \rho_{rb}}{\rho_{842} + \rho_{rb} + 0,5}$$

όπου $\rho_{rb} = \rho_{665} - 1 (\rho_{490} - \rho_{665})$

Enhanced Vegetation Index

$$EVI = 2,5 \frac{\rho_{842} - \rho_{665}}{\rho_{842} + 6\rho_{665} - 7,5\rho_{490} + 100}$$

Triangular Vegetation Index

$$TVI = \frac{1}{2} [120(\rho_{842} - \rho_{560})] - 200(\rho_{665} - \rho_{560})$$

Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index

$$TCARI = 3[(\rho_{700} - \rho_{670})] - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right)$$

Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

$$OSAVI = \frac{(1 + 0,16)(\rho_{800} - \rho_{670})}{(\rho_{800} + \rho_{670} + 0,16)}$$

Photochemical Reflectance Index

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$$

Plant Senescence Reflectance Index

$$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{700}}$$

3. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ LSM

Αφού ολοκληρωνόταν η μέτρηση της ανακλαστικότητας γινόταν η δειγματοληψία φύλλων για εκχύλιση των φωτοσυνθετικών χρωστικών τους. Από κάθε plot

λαμβάνονταν 3 δείγματα που προέρχονταν από διαφορετικά σημεία μέσα στο plot. Το κάθε δείγμα αποτελούνταν από 10 φύλλα. Η επιλογή των φύλλων ήταν τελείως τυχαία και δεν ακολουθούσε κάποιο πρότυπο ή κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Τα φύλλα σφραγίζονταν αεροστεγώς σε πλαστικά σακουλάκια, μεταφέρονταν στο εργαστήριο και μετρούνταν αμέσως. Σε όλα τα φύλλα των δειγμάτων γινόταν αποκοπή των άκρων τους με σκοπό να αποφευχθούν οι ακραίες τιμές και υπολογιζόταν η επιφάνειά τους μέσω μέτρησης του μήκους και του πλάτους τους. Τα 5 από αυτά αποξηραίνονταν ώστε να μετρηθεί το ξηρό βάρος τους. Η αποξήρανση γινόταν στους 80°C για τουλάχιστον 24 ώρες. Μετά την ξήρανση τα δείγματα ζυγίζονταν σε ζυγό ακριβείας και από το ξηρό τους βάρος και την αντίστοιχη επιφάνεια υπολογίζονταν η ειδική μάζα φύλλων εκφρασμένη ως $g\ dm^{-2}$ (Leaf Specific Mass, LSM). Στα άλλα 5 φύλλα γινόταν εκχύλιση των φωτοσυνθετικών χρωστικών (χλωροφύλλες a, b και καροτινοειδή). Η εκχύλιση γινόταν σε διάλυμα ακετόνης 80%. Κατά τη διαδικασία αυτή τα φύλλα τοποθετούνταν σε ένα μικρό γουδί πορσελάνης όπου παρουσία μικρής ποσότητας άμμου, ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$) και του διαλύματος ακετόνης πολτοποιούνταν και στη συνέχεια μεταφέρονταν σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Η προσθήκη $CaCO_3$ αποτρέπει την οξύνιση του διαλύματος που θα είχε σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση του Mg από τα μόρια της χλωροφύλλης και τη δημιουργία φαιοφυτίνης, η οποία παρουσιάζει διαφορετικό φάσμα απορρόφησης. Το εκχύλισμα μεταγγιζόταν σε σωλήνα φυγοκέντρου όπου φυγοκεντρούνταν για 10 min στις 4000 στροφές ανά λεπτό. Το διαυγές πράσινο υπερκείμενο χρησιμοποιούταν ως δείγμα για την φασματοφωτομέτρηση, ενώ το ίζημα απορρίπτονταν. Το υπερκείμενο μεταφερόταν σε ογκομετρικό σωλήνα και καταγραφόταν ο όγκος του. Το δείγμα φωτομετρούταν στα 470, 646, 663 και 720 nm. Η απορρόφηση στα 720 nm οφείλεται σε πιθανό σκεδασμό και όχι στις φωτοσυνθετικές χρωστικές, οπότε η τιμή αυτή αφαιρούνταν από τις υπόλοιπες μετρήσεις. Η ποσότητα των χρωστικών υπολογίστηκε σύμφωνα με τις εξισώσεις (Lichtenthaler and Wellburn 1983):

$$c_a = 12.21 A_{663} - 2.81 A_{646}$$

$$c_b = 20.13 A_{646} - 5.03 A_{663}$$

$$c_{x+c} = \frac{1000 A_{470} - 3.27c_a - 104c_b}{229}$$

όπου: A_λ , η απορρόφηση σε μήκος κύματος λ

c_a , η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a, $\mu\text{g/ml}$ διαλύματος

c_b , η συγκέντρωση της χλωροφύλλης b, $\mu\text{g/ml}$ διαλύματος

c_{x+c} , η συγκέντρωση των συνολικών καροτινοειδών (ξανθοφύλλες, καροτένια), $\mu\text{g/ml}$ διαλύματος.

Με βάση τις εξισώσεις και τις τιμές απορρόφησης στα συγκεκριμένα μήκη κύματος υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης a, της χλωροφύλλης b και των συνολικών καροτινοειδών.

4. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης πραγματοποιήθηκαν στον αγρό με φορητό σύστημα μέτρησης φωτοσύνθεσης LCpro+ (ADC BioScientific Ltd, Hoddesdon, UK), το οποίο παρείχε τη δυνατότητα δημιουργίας συνθηκών φωτισμού και θερμοκρασίας. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από την ένταση του φωτός (9 βήματα σε εντάσεις από 0 έως $1840 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) σε σταθερή θερμοκρασία γύρω από τη βέλτιστη και σε συγκεντρώσεις CO_2 και υδρατμών τις επικρατούσες στο περιβάλλον στη διάρκεια της μέτρησης. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εξάρτησης της φωτοσύνθεσης από τη θερμοκρασία σε κορεσμένη ένταση φωτός ($1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) και συγκεντρώσεις CO_2 και υδρατμών τις επικρατούσες στο περιβάλλον. Λόγω της μεγάλης διάρκειας των μετρήσεων (20 min για την εξάρτηση από το φως και 90 min για την εξάρτηση από την θερμοκρασία) σε κάθε ημερομηνία πραγματοποιήθηκαν 1-2 μετρήσεις εξάρτησης από το φως και 1 από την θερμοκρασία σε φύλλα τυχαία επιλεγμένων εύρωστων φυτών, με στόχο να προσδιοριστούν τα φωτοσυνθετικά χαρακτηριστικά του είδους και όχι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

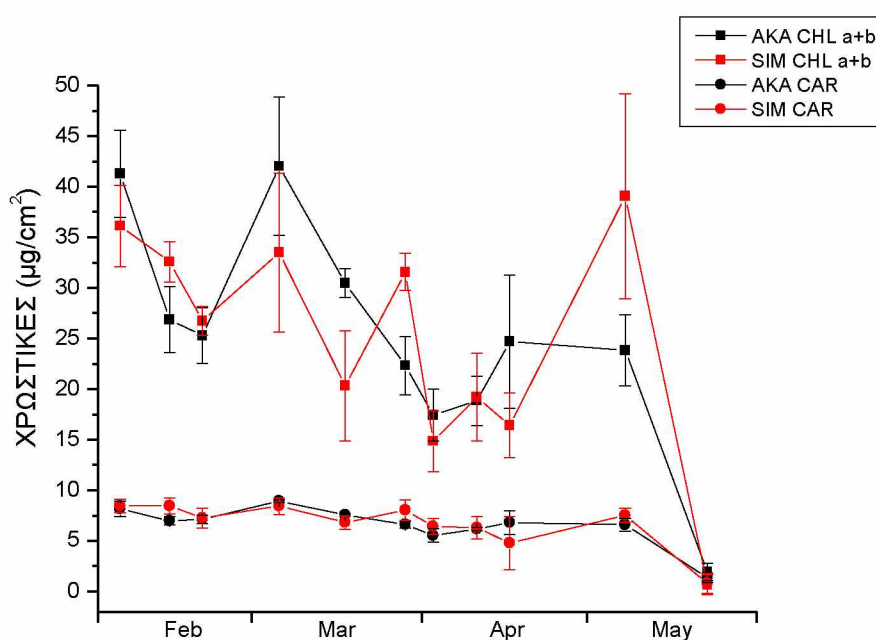
Ο έλεγχος της σημαντικότητας των διαφορών των μετρηθέντων οικοφυσιολογικών παραμέτρων μεταξύ των μεταχειρίσεων πραγματοποιήθηκε με one-way ANOVA. Τόσο αυτή η ανάλυση όσο και ο έλεγχος της σημαντικότητας των συσχετίσεων

μεταξύ δορυφορικών και επίγειων μετρήσεων έγιναν με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου IBM SPSS Statistics v.26.0 (IBM corp.).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1. ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ

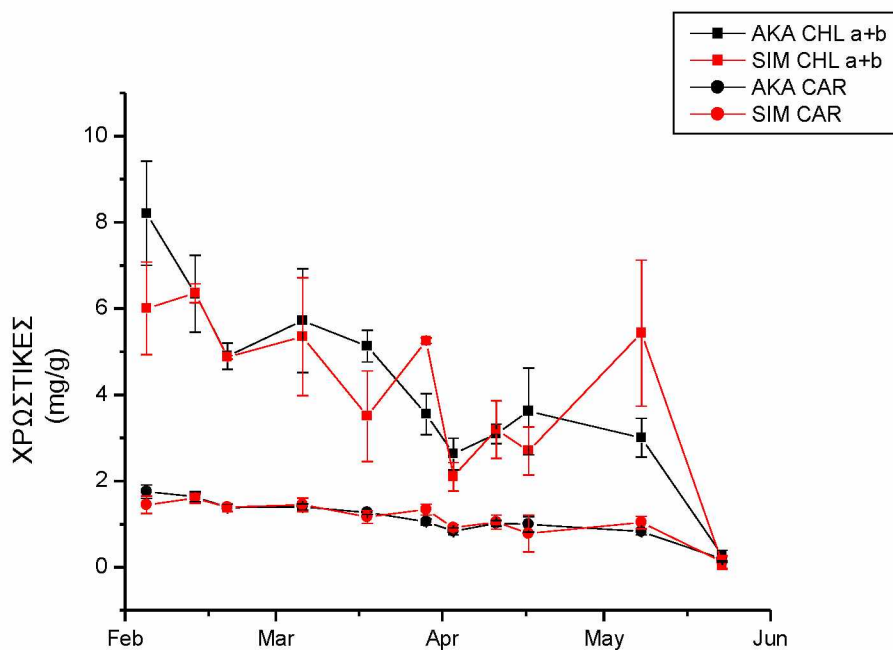
Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης της καλλιέργειας απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 1. Οι συγκεντρώσεις των ολικών χλωροφυλλών (a+b) εμφανίζουν διακυμάνσεις αλλά γενικά διατηρούν μια πτωτική τάση με την πάροδο του χρόνου. Παρά τις διαφορές σε επιμέρους ημερομηνίες, δεν καταγράφηκαν σαφείς διαφοροποιήσεις ως προς το πρότυπο μεταβολής μεταξύ ακαλλιέργειας και συμβατικής καλλιέργειας. Τα καροτινοειδή εμφάνισαν παρόμοια επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για τις δύο μεταχειρίσεις.



Σχήμα 1: Διακύμανση των συγκεντρώσεων των ολικών χλωροφυλλών (a+b, τετράγωνα) και των καροτινοειδών (ρόμβοι), εκφρασμένων ανά μονάδα επιφάνειας φύλλου, καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου του σιταριού.

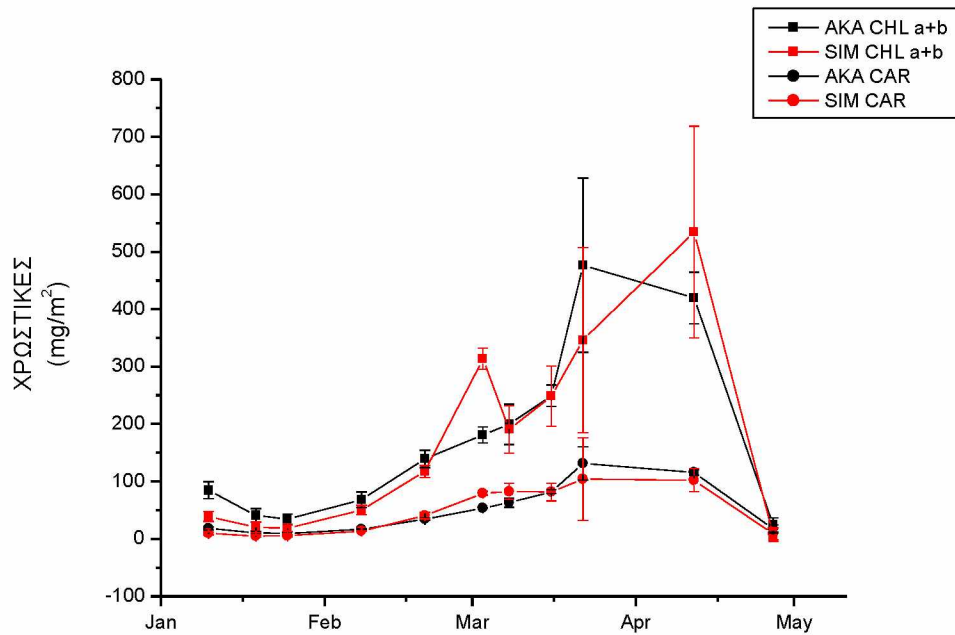
Οι διακυμάνσεις των ολικών χλωροφυλλών που φάνηκαν στην ανά μονάδα επιφάνειας έκφραση της συγκέντρωσής τους εξομαλύνονται όταν οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών εκφραστούν ανά μονάδα ξηρού βάρους του φύλλου,

πληροφορία που προκύπτει από το LSM (ειδική μάζα φύλλων). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2, η ανά βάρος φύλλου συγκέντρωση των χρωστικών εμφανίζει μία σταδιακή πτώση με την ωρίμανση της καλλιέργειας και καταλήγει στην ελάχιστη τιμή της στα τέλη Μαΐου, χωρίς να εμφανίζει διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.



Σχήμα 2: Διακύμανση των συγκεντρώσεων των ολικών χλωροφυλλών (a+b, τετράγωνα) και των καροτινοειδών (ρόμβοι), εκφρασμένων ανά μονάδα ξηρού βάρους φύλλου, καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου του σιταριού.

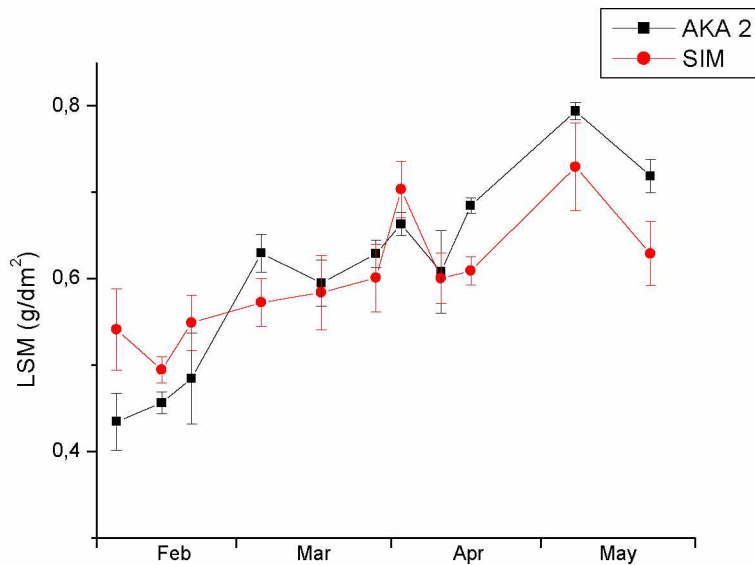
Αντίστοιχη εξομάλυνση των διακυμάνσεων των ολικών χλωροφυλλών παρουσιάζεται εάν οι χρωστικές εκφραστούν ανά επιφάνεια εδάφους (πολλαπλασιάζοντας με τον LAI), όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Έτσι, η αναπτυξιακή πορεία της καλλιέργειας αποδίδεται ικανοποιητικά, με σταδιακή άνοδο στη διάρκεια του Μαρτίου – Απριλίου και απότομη πτώση το Μάιο.



Σχήμα 3: Διακύμανση των συγκεντρώσεων των ολικών χλωροφυλλών (a+b, τετράγωνα) και των καροτινοειδών (ρόμβοι), εκφρασμένων ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους, καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου του σιταριού.

2. ΕΙΔΙΚΗ ΜΑΖΑ ΦΥΛΛΩΝ (Leaf Specific Mass, LSM)

Ο δείκτης ξηροφιλίας (LSM) αποδίδει την ειδική μάζα των φύλλων, δηλαδή την επένδυση ξηρής βιομάζας ανά μονάδα επιφάνειας φύλλου. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση του LSM από την αρχή εμφάνισης των φύλλων μέχρι το τέλος Μαΐου. Στην καμπύλη παρατηρείται μια αύξηση πάντα με κάποιες διακυμάνσεις μέχρι και τις αρχές Μαΐου ενώ στη συνέχεια εμφανίζει μία σταδιακή πτώση καθώς ολοκληρώνεται ο βιολογικός κύκλος του σιταριού.



Σχήμα 4: Διακύμανση του LSM στις δύο μεταχειρίσεις (AKA2: κόκκινη γραμμή και SIM: μαύρη γραμμή) εκφρασμένου σε mg/g, καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου του σιταριού.

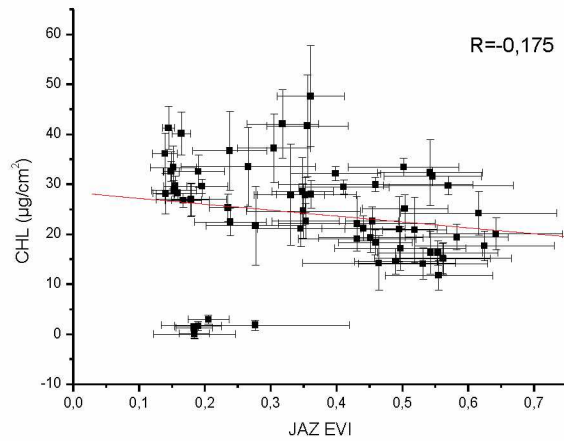
3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΟ JAZ ΜΕ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ

Από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με το φασματοραδιόμετρο Jaz υπολογίστηκαν οι δείκτες βλάστησης (Δ.Β.). Ο κάθε ένας από αυτούς συσχετίστηκε με τις φωτοσυνθετικές χρωστικές που μετρήθηκαν παραπάνω. Συνεπώς έγιναν συσχετίσεις των Δ.Β. με τις χλωροφύλλες εκφρασμένες ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg/g) και ανά επιφάνεια εδάφους (mg/m^2). Αντίστοιχα έγιναν και συσχετίσεις Δ.Β. με τα καροτινοειδή. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης R που προέκυψαν. Παρατηρείται ότι οι συσχετίσεις των χρωστικών που δεν είναι εκφρασμένες σε σχέση με το LAI είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Αντίθετα όταν οι χρωστικές εκφράζονται ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους, δηλαδή συμπεριλαμβάνουν και την πληροφορία του LAI δίνουν πολύ καλές συσχετίσεις της τάξης του 0,7 ακόμα και του 0,8 (στατιστικώς σημαντικές).

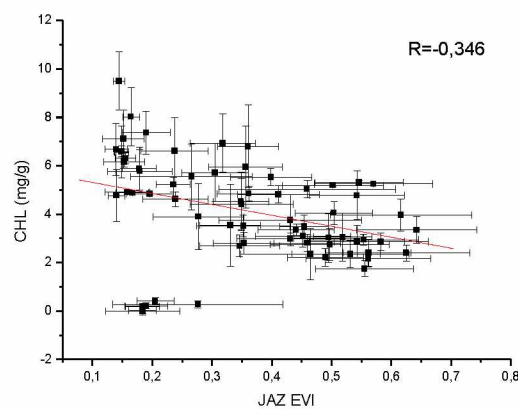
	JAZ					
	CHL			CAR		
	$\mu\text{g cm}^{-2}$	mg g^{-1}	mg m^{-2}	$\mu\text{g cm}^{-2}$	mg g^{-1}	mg m^{-2}
NDVI	-0,117	-0,298	0,684	0,041	-0,208	0,787
NDRE	-0,118	-0,297	0,709	0,036	-0,211	0,813
SAVI	-0,119	-0,299	0,683	0,040	-0,209	0,787
EVI	-0,175	-0,346	0,621	0,010	-0,233	0,748
PRI	0,006	-0,067	0,477	0,181	-0,067	0,593
TCARI	-0,05	-0,197	0,256	0,148	-0,061	0,345
PSRI	-0,087	0,073	-0,588	-0,284	-0,055	-0,681
TVI	-0,07	-0,236	0,592	0,132	-0,109	0,711
SARVI	-0,09	-0,261	0,664	0,078	-0,162	0,771
OSAVI	-0,105	-0,284	0,675	0,058	-0,191	0,779
TCARI/OSAVI	0,003	0,092	-0,632	0,009	0,123	-0,656

Πίνακας 2: Συντελεστές συσχέτισης των Δ.Β. που προκύπτουν από το φασματοραδιόμετρο JAZ με τη συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών (όπου CHL, χλωροφύλλες και CAR, καροτινοειδή). Η κάθε κατηγορία φωτοσυνθετικών χρωστικών εκφράζεται ως συγκέντρωση ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g cm}^{-2}$), ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg g^{-1}) και ανά επιφάνεια εδάφους (mg m^{-2}). Με έντονα γράμματα εμφανίζεται η υψηλότερη τιμή R σε κάθε στήλη.

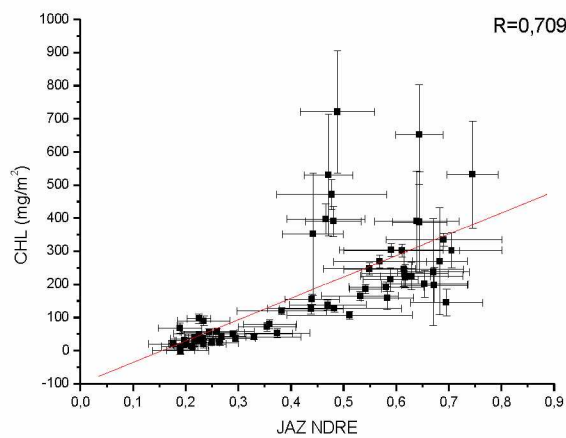
Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των Δ.Β. προερχόμενων από το Jaz με τη συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών (στις τρεις εκφράσεις τους) που εμφάνισαν τους μεγαλύτερους R. Τόσο η συσχέτιση EVI-συγκέντρωση ανά επιφάνεια φύλλου, όσο και η EVI-συγκέντρωση ανά ξηρό βάρος φύλλου είχαν εξαιρετικά χαμηλές τιμές R (5α και 5β). Αντίθετα μία ευθεία θετική συσχέτιση με υψηλό R καταγράφηκε μεταξύ της συγκέντρωση χλωροφυλλών ανά επιφάνεια εδάφους και του NDRE (5γ).



(α)



(β)

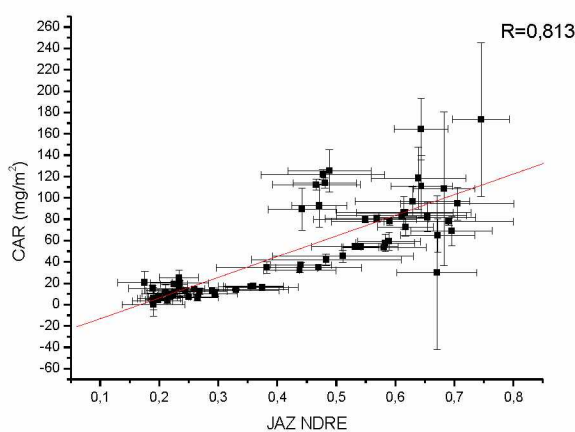
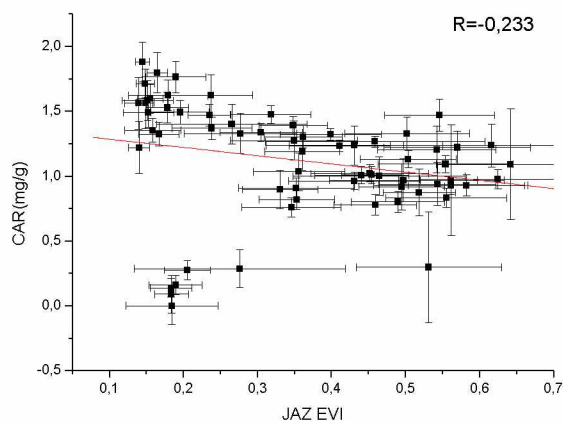
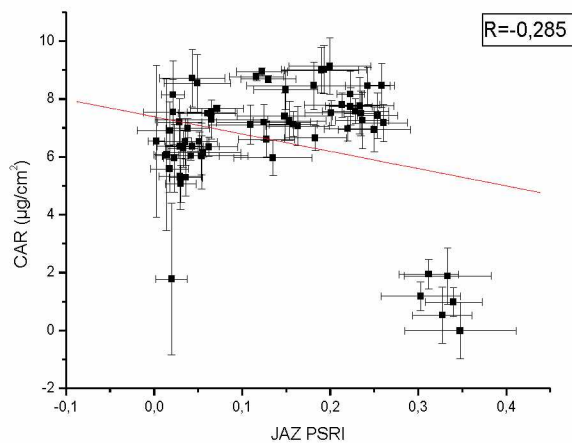


(γ)

Σχήμα 5: Αποτύπωση των συσχετίσεων που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους συντελεστές μεταξύ των Δ.Β. που προέκυψαν από το Jaz και της συγκέντρωσης χλωροφυλλών. Το (α) αφορά τη συσχέτιση EVI-συγκέντρωσης χλωροφυλλών ανά επιφάνεια φύλλου, το (β) το EVI-συγκέντρωση χλωροφυλλών ανά ξηρό βάρος φύλλου και το (γ) το NDRE-συγκέντρωση των χλωροφυλλών ανά επιφάνεια εδάφους.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των Δ.Β. προερχόμενων από το Jaz με τη συγκέντρωση των καροτινοειδών (στις τρεις εκφράσεις τους) που

εμφάνισαν τους μεγαλύτερους R. Η καλύτερη εικόνα προκύπτει από τη συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης καροτινοειδών ανά επιφάνεια εδάφους και του NDRE, όπου και πάλι καταγράφηκε μία ευθεία θετική συσχέτιση με υψηλό R (6γ), η οποία ήταν στατιστικώς σημαντική ($p < 0.05$).



Σχήμα 6: Αποτύπωση των συσχετίσεων που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους συντελεστές μεταξύ των Δ.Β. που προέκυψαν από το Jaz και της συγκέντρωσης καροτινοειδών. Το (α) αφορά τη συσχέτιση EVI-συγκέντρωση καροτινοειδών ανά επιφάνεια φύλλου, το (β) το EVI-συγκέντρωση καροτινοειδών ανά ξηρό βάρος

φύλλου και το (γ) το NDRE-συγκέντρωση των καροτινοειδών ανά επιφάνεια εδάφους.

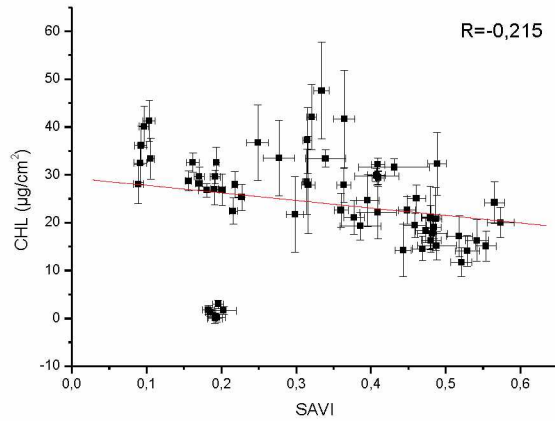
4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ Sentinel-2 ΜΕ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΧΡΩΣΤΙΚΕΣ

Πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών με τέσσερις δείκτες που προέκυψαν από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2 για την συγκεκριμένη καλλιέργεια στον ίδιο πειραματικό αγρό. Οι τιμές των δεικτών πάρθηκαν από την πτυχιακή διατριβή της Σ. Μεγγούδη (2020). Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης των Δ.Β. του Sentinel-2 με τις χλωροφύλλες εκφρασμένες ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg/g) και ανά επιφάνεια εδάφους (mg/m^2). Αντίστοιχα παρουσιάζονται και οι συσχετίσεις Δ.Β. με τα καροτινοειδή. Και εδώ παρατηρείται το ίδιο πρότυπο των χαμηλών συσχετίσεων των Δ.Β. με τις συγκεντρώσεις των χρωστικών που δεν εμπεριέχουν την πληροφορία από το LAI και των μεγάλων όταν οι χρωστικές εκφράζονται σε σχέση με αυτό, δηλαδή ανά επιφάνεια εδάφους. Οι συσχετίσεις των χρωστικών με τους Δ.Β. που προκύπτουν από τον Sentinel-2 είναι ελαφρώς υψηλότερες από αυτές που προκύπτουν από φασματοραδιόμετρο.

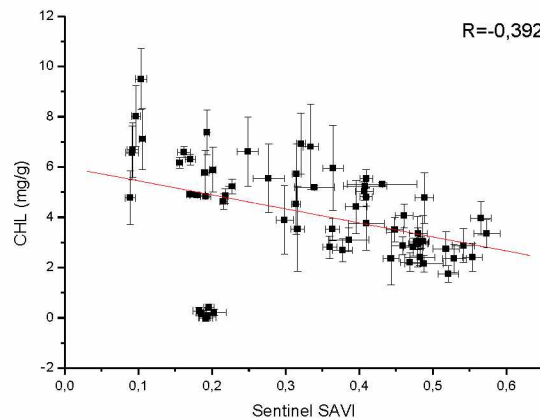
	Sentinel-2					
	CHL			CAR		
	$\mu\text{g cm}^{-2}$	mg g^{-1}	mg m^{-2}	$\mu\text{g cm}^{-2}$	mg g^{-1}	mg m^{-2}
NDVI	-0,176	-0,351	0,637	0,002	-0,242	0,754
NDRE	-0,173	-0,346	0,663	-0,002	-0,243	0,781
SAVI	-0,215	-0,392	0,624	-0,039	-0,283	0,745
EVI	-0,201	-0,371	0,615	-0,022	-0,243	0,740

Πίνακας 3: Συντελεστές συσχέτισης των Δ.Β. που προκύπτουν από τον Sentinel-2 με τη συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών (όπου CHL, χλωροφύλλες και CAR, καροτινοειδή). Η κάθε κατηγορία φωτοσυνθετικών χρωστικών εκφράζεται ως συγκέντρωση ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g cm}^{-2}$), ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg g^{-1}) και ανά επιφάνεια εδάφους (mg m^{-2}). Με έντονα γράμματα εμφανίζεται η υψηλότερη τιμή R σε κάθε στήλη.

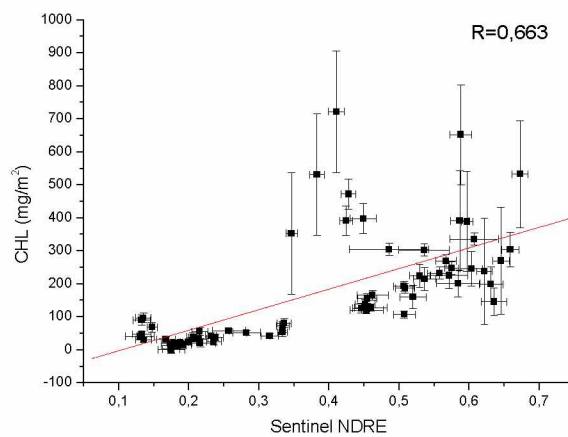
Στα Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζονται οι γραφικές απεικονίσεις των συσχετίσεων του Πίνακα 3 που παρουσίασαν μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης. Και στην περίπτωση των Δ.Β. του Sentinel-2, η βέλτιστη και στατιστικώς σημαντική συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ του NDRE και της συγκέντρωσης χλωροφυλλών αλλά και του NDRE-συγκέντρωσης καροτινοειδών.



(α)

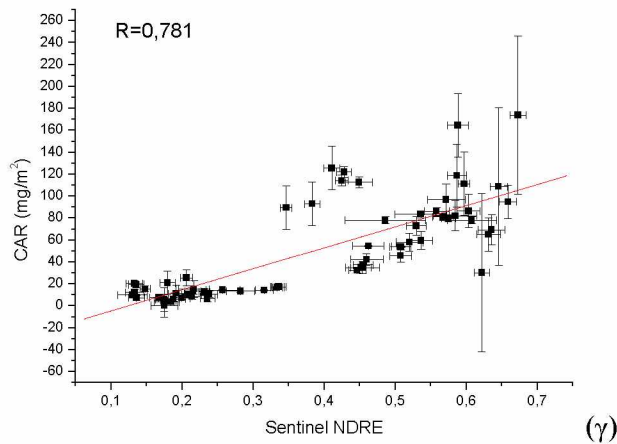
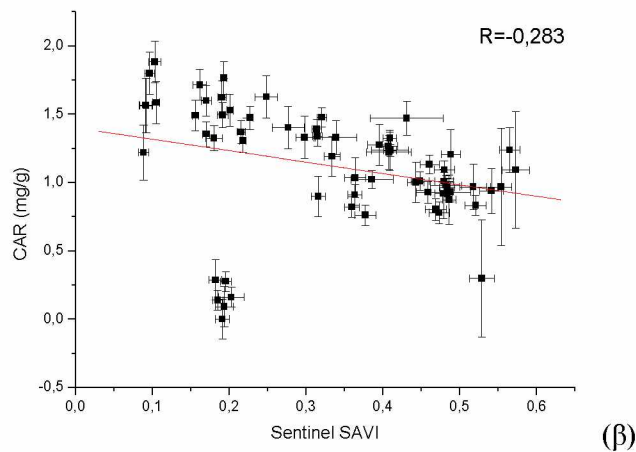
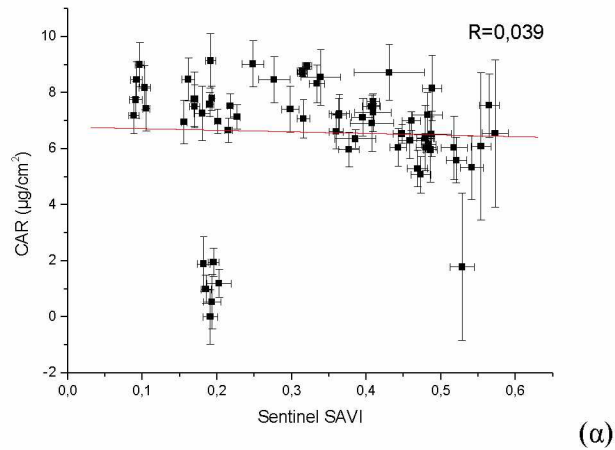


(β)



(γ)

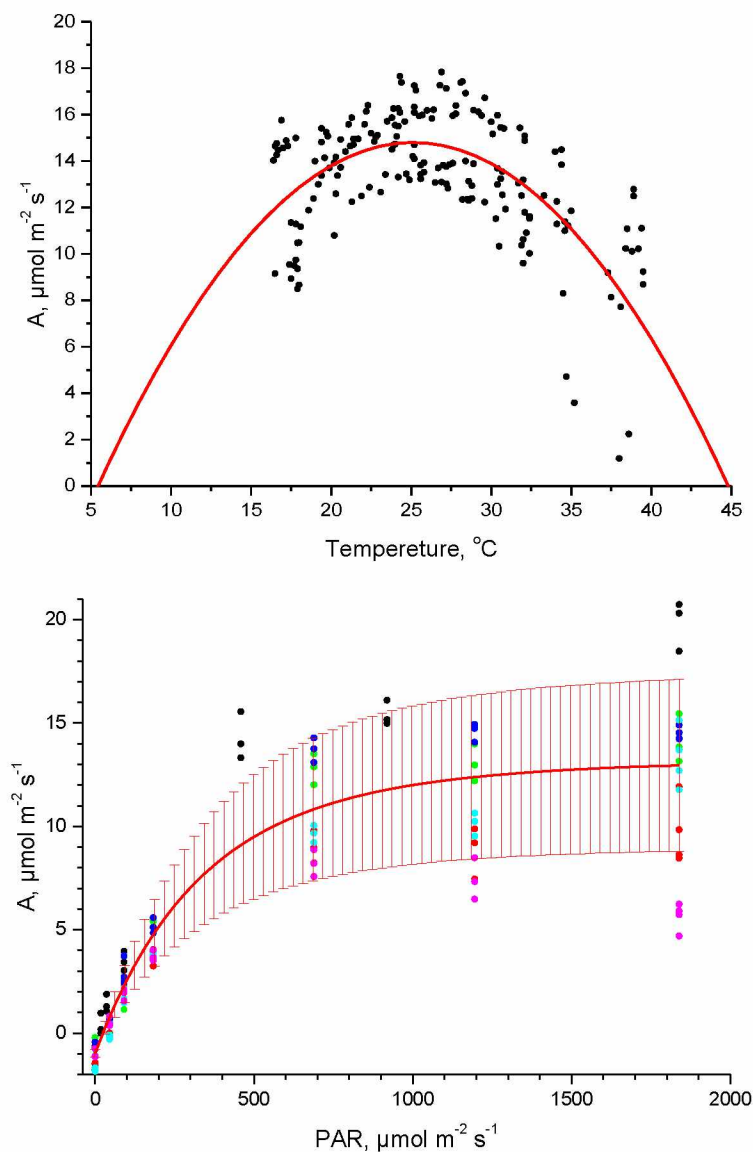
Σχήμα 7: Αποτύπωση των συσχετίσεων που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους συντελεστές μεταξύ των Δ.Β. που προέκυψαν από τον Sentinel-2 και της συγκέντρωσης χλωροφυλλών. Το (α) αφορά τη συσχέτιση SAVI-συγκέντρωσης χλωροφυλλών ανά επιφάνεια φύλλου, το (β) το SAVI-συγκέντρωση χλωροφυλλών ανά ξηρό βάρος φύλλου και το (γ) το NDRE-συγκέντρωση των χλωροφυλλών ανά επιφάνεια εδάφους.



Σχήμα 8: Αποτύπωση των συσχετίσεων που παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους συντελεστές μεταξύ των Δ.Β. που προέκυψαν τον Sentinel-2 και της συγκέντρωσης καροτινοειδών. Το (α) αφορά τη συσχέτιση SAVI-συγκέντρωσης καροτινοειδών ανά

επιφάνεια φύλλου, το (β) το SAVI-συγκέντρωση καροτινοειδών ανά ξηρό βάρος φύλλου και το (γ) το NDRE-συγκέντρωση των καροτινοειδών ανά επιφάνεια εδάφους.

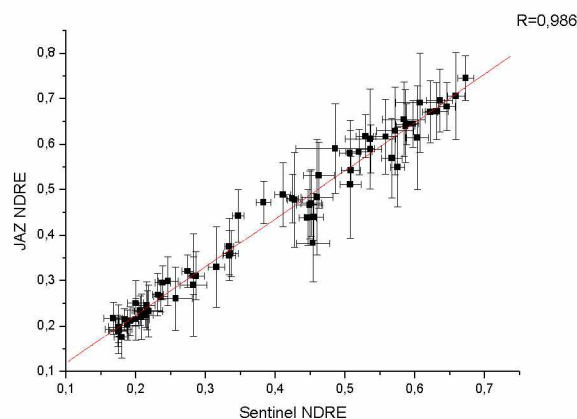
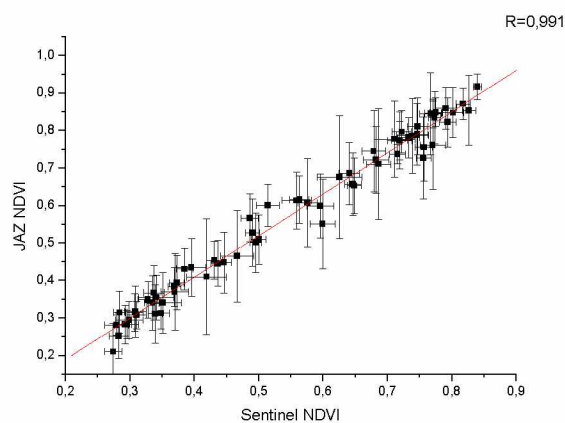
Κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου των φυτών καταγράφηκε η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης του σιταριού από την θερμοκρασία και το φως (Σχήμα 9). Ο στόχος ήταν να προσδιοριστούν τα φωτοσυνθετικά χαρακτηριστικά του είδους και όχι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Σε ότι αφορά την εξάρτηση από τη θερμοκρασία, φαίνεται η βέλτιστη θερμοκρασία να εμφανίζεται στους 25-26 °C και η ελάχιστη και μέγιστη στους 5 και 45 °C αντίστοιχα. Στο ίδιο σχήμα αποτυπώνεται η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από το φως. Από το αρχικό (ευθύγραμμο) μέρος της καμπύλης σε χαμηλές εντάσεις, προκύπτει μια φωτοσυνθετική απόδοση 0.036 mol CO₂ mol⁻¹ PAR, που αντιστοιχεί σε 0.432 g C mol⁻¹ PAR.

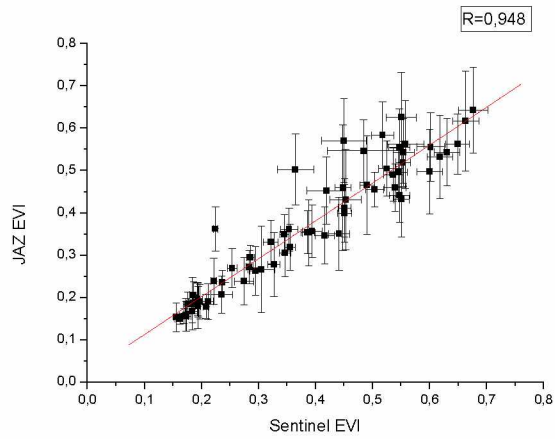


Σχήμα 9: Εξάρτηση της φωτοσύνθεσης του σιταριού από τη θερμοκρασία (επάνω) και την ένταση του φωτός (κάτω).

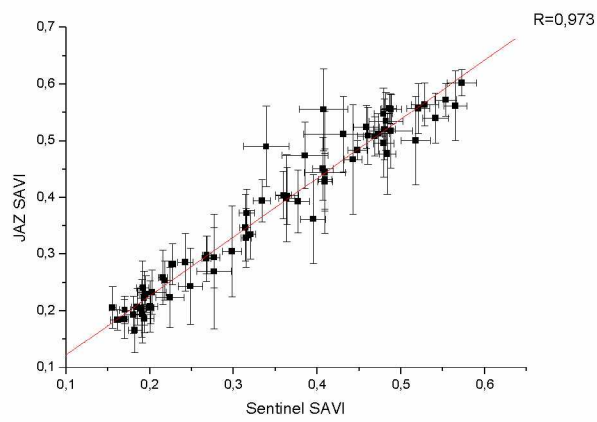
5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ JAZ ΜΕ ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ Sentinel-2

Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις των Δ.Β. από τα δεδομένα του φασματοραδιόμετρου με τέσσερις δείκτες που προέκυψαν από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-2. Συγκεκριμένα συσχετίστηκαν οι NDVI, NDRE, EVI και SAVI. Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις όπου παρατηρείται πως είναι στατιστικώς σημαντικές ($p < 0.001$), καθώς ο NDVI εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης $R = 0.991$, ο NDRE $R = 0.986$, ο SAVI $R = 0.973$ και τέλος ο EVI $R = 0.948$.





(γ)



(δ)

Σχήμα 10: Αποτύπωση των συσχετίσεων μεταξύ των Δ.Β. που προέκυψαν τον Sentinel-2 και των Δ.Β. που προέκυψαν από το JAZ. Το (α) αφορά τη συσχέτιση του NDVI, (β) το NDRE (γ) τον EVI και το (δ) τον SAVI.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα μελέτη μετρήθηκαν φωτοσυνθετικά χαρακτηριστικά και δείκτες βλάστησης, όπως προκύπτουν από την διακύμανση της ανακλαστικότητας, καλλιέργειας σίτου προκειμένου να συλλεχθούν δεδομένα εισόδου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών, η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από την ένταση φωτός και τη θερμοκρασία, και εξήχθησαν δείκτες βλάστησης τόσο από επίγειο όργανο (Jaz) όσο και δορυφορικοί (Sentinel-2) σε μια καλλιέργεια σκληρού σιταριού καθ' όλη τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου. Στην καλλιέργεια εφαρμόστηκαν δύο μεταχειρίσεις, συμβατική κατεργασία (SIM) και ακαλλιέργεια (AKA2).

Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών και στις δύο μεταχειρίσεις εμφάνισαν μια σταδιακή πτωτική τάση με την πάροδο του χρόνου και μία απότομη πτώση το Μάιο, όταν τα φύλλα αρχίζουν πια να κιτρινίζουν προχωρώντας προς τη γήρανση. Θα πρέπει να σημειωθεί πως και στις δύο μεταχειρίσεις παρατηρήθηκε το ίδιο πρότυπο μεταβολής αν και υπήρξαν ορισμένες διαφορές στις επιμέρους ημερομηνίες. Το παραπάνω αποτέλεσμα εμφανίστηκε στην έκφραση της συγκέντρωσης χρωστικών τόσο ανά επιφάνεια φύλλου, όσο και ανά ξηρό βάρος φύλλου. Φαίνεται ότι από πολύ νωρίς κατά την ανάπτυξη των φύλλων, τα φυτά είχαν πλήρως ανεπτυγμένα φύλλα (στα οποία γίνονταν οι μετρήσεις), χωρίς να εμφανίζουν μία παρατεταμένη περίοδο ανάπτυξης του φύλλου με επακόλουθη άνοδο της συγκέντρωσης χλωροφυλλών. Όταν όμως ενσωματώσουμε στην έκφραση της συγκέντρωσης των χρωστικών την πληροφορία που εμπεριέχεται στο LAI, δηλαδή την αύξηση της βιομάζας του φυτού ως προς την μονάδα εδάφους στην οποία αυτή προβάλλεται, λαμβάνουμε μία πιο αντιπροσωπευτική εικόνα. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται μία σταδιακή αύξηση, με μέγιστο στα μέσα Απριλίου για την AKA2 και αρχές Μαΐου για τη SIM. Δεν παρατηρήθηκε όμως διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο στο περιεχόμενο των φύλλων σε χλωροφύλλες, όσο και σε καροτινοειδή. Το αναμενόμενο ήταν να υπάρξει μια σταθερή διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων καθώς, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέθοδος της ακαλλιέργειας εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ουσία, μικροβιακή βιομάζα, διάφορα θρεπτικά στοιχεία (N, P, K), ενώ βελτιώνει και το πορώδες και την συνολική

σταθερότητα του εδάφους (Peigne et al., 2007). Εντούτοις, αυτό δεν συνέβη στην συγκεκριμένη περίπτωση πιθανώς λόγω της αυξημένης αλατότητας του εδάφους.

Ο δείκτης ξηροφιλίας του σιταριού (LSM) εμφάνισε μία σταδιακή άνοδο κατά την αναπτυξιακή περίοδο του φυτού, με μέγιστο στις αρχές Μαΐου, χρονικό σημείο πέρα από το οποίο αρχίζει το κιτρίνισμα/γήρανση των φύλλων. Η πορεία του δείκτη αυτού, με δεδομένη την ταχύτατη ωρίμανση των φύλλων όπως αναλύθηκε παραπάνω, πιθανώς οφείλεται σε σταδιακή αφυδάτωση του φύλλου κάτι που το κάνει πιο συμπαγές, πληροφορία που καταγράφεται στον LSM. Η αύξηση του LSM από την άνοιξη προς το καλοκαίρι είναι μία συνήθης προσαρμογή των φυτών διαφόρων οικοσυστημάτων (Roscher et al., 2011, Yang et al., 2017).

Από τις καμπύλες εξάρτησης της φωτοσύνθεσης του σίτου από τη θερμοκρασία προέκυψε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στους 25-26 °C και η ελάχιστη και μέγιστη στους 5 και 45 °C αντίστοιχα. Η εξάρτηση της φωτοσύνθεσης από την ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας και συγκεκριμένα από το αρχικό (ευθύγραμμο) μέρος της καμπύλης σε χαμηλές εντάσεις, υποδεικνύει μια φωτοσυνθετική απόδοση $0.036 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PAR}$, που αντιστοιχεί σε $0.432 \text{ g C mol}^{-1} \text{ PAR}$, τιμές που συμφωνούν με τη σχετική βιβλιογραφία (Yang et al. 2019).

Οι δείκτες που υπολογίστηκαν από τις επιτόπιες μετρήσεις (Jaz) και από τα δεδομένα του δορυφόρου εμφάνισαν εξαιρετικά καλή και στατιστικώς πολύ σημαντική συσχέτιση μεταξύ τους. Αναλυτικότερα ο NDVI εμφάνισε συντελεστή συσχέτισης $R= 0.991$, ο NDRE $R= 0.986$, ο SAVI $R=0.973$ και τέλος ο EVI $R= 0.948$. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι οι δορυφορικοί δείκτες μπορούν να αποδώσουν πολύ καλά την εικόνα που λαμβάνουμε και από τα επίγεια όργανα που έχουν μεγαλύτερη αναλυτική ικανότητα. Όλοι οι δείκτες (από το Jaz και τον Sentinel-2) συσχετίστηκαν με τις φωτοσυνθετικές χρωστικές εκφρασμένες ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg/g) και ανά επιφάνεια εδάφους (mg/m^2). Στις δύο πρώτες περιπτώσεις παρατηρήσαμε ιδιαίτερα χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης. Παρόλα αυτά εμφανίστηκαν ιδιαίτερα υψηλές συσχετίσεις ($R=0,66-0,78$) όταν η συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών εκφράζονταν ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς τότε εμπεριέχονταν και η πληροφορία που προέρχεται από το LAI, της αύξησης, δηλαδή, της βιομάζας καθώς προχωρά η αναπτυξιακή περίοδος. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στο ότι το LAI εμφανίζει καλές συσχετίσεις με

τους δείκτες βλάστησης (Huete et al. 2002). Αν όμως υπερβεί σε τιμή 3 τότε χάνεται η αναλογική σχέση μεταξύ του δείκτη και της βιομάζας (Prabhakara 2015, Gaso et al. 2019). Με την συμπερίληψη της πληροφορίας του LAI, η συγκέντρωση των χρωστικών του σίτου εμφανίζει μία ευθεία θετική και ισχυρή συσχέτιση με τους δείκτες βλάστησης, αποτέλεσμα που υποστηρίζεται από τη σχετική βιβλιογραφία (Prabhakara 2015, Yang et al. 2017). Ακριβώς για το λόγο αυτό συγκεκριμένοι δείκτες βλάστησης όπως ο NDVI και ο EVI θεωρούνται ισχυρό εργαλείο για την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της ανάπτυξης της καλλιέργειας και της συγκέντρωσης των χρωστικών της (Yang et al. 2017). Η παρούσα εργασία προτείνει και τον NDRE ως δείκτη που αποτυπώνει ικανοποιητικά τη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών σίτου, όταν αυτές εκφράζονται ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών εμφανίζουν μία αργή και σταδιακή πτώση από το Φεβρουάριο μέχρι τα μέσα Μαΐου, οπότε αρχίζει η γήρανση των φύλλων.
- Η μέγιστη φωτοσύνθεση του σίτου στην συγκεκριμένη καλλιεργητική περίοδο και έδαφος που διεξήχθη το πείραμα καταγράφηκε στους 25-26°C και η ελάχιστη σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5°C και μεγαλύτερες των 45°C.
- Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές εμφανίζουν μία ευθεία συσχέτιση με τους δείκτες βλάστησης. Αν και όταν είναι εκφρασμένες ανά επιφάνεια φύλλου ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) και ανά ξηρό βάρος φύλλου (mg/g) εμφανίζουν χαμηλές συσχετίσεις, όταν εκφράζονται ανά επιφάνεια εδάφους (mg/m^2) παρατηρούνται συσχετίσεις της τάξης του 0,7 ή και 0,8.
- Ο NDRE που προέκυψε τόσο από τις μετρήσεις του επίγειου φασματοραδιόμετρου (Jaz), όσο και από τον δορυφόρο Sentinel-2 εμφάνισε τις ισχυρότερες συσχετίσεις με τη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών σίτου, όταν αυτές εκφράζονται ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους. Αποτυπώνει

επομένως την συγκεκριμένη αναπτυξιακή παράμετρο πιο ικανοποιητικά σε σχέση με τους υπόλοιπους, ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάστησης (NDVI, EVI κ.α.).

- Οι δείκτες βλάστησης που εξάγονται από το επίγειο φασματοραδιόμετρο (Jaz) και τον δορυφόρο Sentinel-2 εμφανίζουν εξαιρετικά καλές συσχετίσεις μεταξύ τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ESA Standard. SENTINEL-2 User Handbook. 24 7 2015. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (πρόσβαση 6, 2020).
- Fitzgerald T., Rodriguez G., Christensen G., Belford L., Sadras P., Clarke V. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agriculture*, 7, 233-248, 2006.
- Garbulsky M., Peñuelas J., Gamon J., Inoue Y., Filella I. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115, 281-297, 2011.
- Huete A., Liu H., Batchily K., Van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 3, 440-451, 1997.
- Jensen J. Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος: Μια προοπτική για τα φυσικά διαθέσιμα. Μετάφραση: Βαλάνη Σ. Αθήνα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2016.
- Li F., Miao Y., Feng G., Yuan F., Yue S., Gao X., Liu Y., Liu B., Ustin S., Chen X. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157, 111-123, 2014.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11, 591–592, 1983.
- Medlyn B. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology*, 18, 3, 167-176, 1998.
- Peigné J., Ball B., Roger-Estrade J., David C. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management*, 6, 23, 129-144, 2007.
- Ren S., Chen X., An S. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the

- Inner Mongolian Grassland. *International Journal of Biometeorology* 61 (4): 601-612, 2017.
- Roscher C., Kutsch W.L., Kolle O., Ziegler W., Schulze E.D. Adjustment to the light environment in small-statured forbs as a strategy for complementary resource use in mixtures of grassland species. *Annals of botany* 107(6):965-79, 2011.
- Royo C., Soriano J., Alvaro F. Wheat: A Crop in the Bottom of the Mediterranean Diet Pyramid. *IntechOpen*, 2017.
- Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402, 2020.
- Wiegand C., Richardson A. Use of Spectral Vegetation Indices to Infer Leaf Area, Evapotranspiration and Yield: I. Rationale. *Agronomy Journal*, 1, 5: 623-629, 1990.
- Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, Article ID 1353691, 2017.
- Yang H., Yang H., Heskell M., Sun S. Tang J. Seasonal variations of leaf and canopy properties tracked by ground-based NDVI imagery in a temperate forest. *Scientific reports* 7: 1267, 2017.
- Yang, X., Li, J., Yu, Q., Ma, Y., Tong, X., Feng, Y., Tong, Y. Impacts of diffuse radiation fraction on light use efficiency and gross primary production of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275, 233-242, 2019.
- Καρυδάς Χ., Συλλαίος Ν. Γεωργία Ακριβείας: Περιγραφή της μεθόδου – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. 2ο ειδικό συνέδριο “Πληροφορικά συστήματα στον Αγροτικό Τομέα” της Ελληνικής Εταιρείας Επιχειρησιακών Ερευνών. Χανιά, 2000. 134-146.
- Μάρκος Ν.Κ. «Ανάπτυξη μοντέλου φωτοσύνθεσης για την εκτίμηση παραγωγικότητας μεσογειακών οικοσυστημάτων.» Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών. Εργαστήριο Βοτανικής,

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Επιστημών και Τεχνολογιών, Ιωάννινα, 2013.

Μεγγούδη Σ. Μετρήσεις αναπτυξιακών παραμέτρων και υδατικής κατάστασης σε καλλιέργεια σίτου για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής με τη χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2. Πτυχιακής εργασία στο Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.

Ξενούλης Μ. Χαρτογράφηση της αναβλάστησης του φυσικού οικοσυστήματος της περιοχής Πάρνηθας Αττικής με χρήση δορυφορικών παρατηρήσεων και γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2012, 10-16.

Παπακώστα-Τασοπούλου, Δ. Ειδική Γεωργία, Σιτηρά και Ψυχανθή. Θεσσαλονίκη: Σύγχρονη Παιδεία, 2012.

Περάκης Κ., Μουσιάδης Α., Φαρασλής Ι. Η τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες. Αθήνα, 2015.

Σταγάκης Σ. «Αξιολόγηση και χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της δυναμικής χερσαίων οικοσυστημάτων.» Διδακτορική Διατριβή, Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών. Εργαστήριο Βοτανικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Επιστημών και Τεχνολογιών, Ιωάννινα, 2012.